

DOI: 10.20103/j.stxb.202403200578

秦爱丽, 刘博, 陈强, 郑祥坤, 金崑. 伊犁和塔城地区新疆野苹果种群结构及动态特征. 生态学报, 2025, 45(1): 197-209.

Qin A L, Liu B, Chen Q, Zheng X K, Jin K. Population structure and dynamic characteristics of *Malus sieversii* distributed in Ili and Tacheng regions of Xinjiang, China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 197-209.

## 伊犁和塔城地区新疆野苹果种群结构及动态特征

秦爱丽<sup>1</sup>, 刘博<sup>2</sup>, 陈强<sup>3</sup>, 郑祥坤<sup>4</sup>, 金崑<sup>1,\*</sup>

1 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 国家林业和草原局生物多样性保护重点实验室, 北京 100091

2 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081

3 塔城地区林业科学研究所, 伊犁 834700

4 北京市八一学校附属玉泉中学, 北京 100091

**摘要:**第三纪孑遗植物新疆野苹果,是现代栽培苹果的祖先,也是国家Ⅱ级重点保护野生植物。目前国内仅分布在新疆伊犁和塔城地区。近十几年来,其分布面积、种群和个体数量日益减少。为全面摸清新疆野苹果在国内整个分布区的生存现状、了解其群落物种组成、种群结构与动态特征,对分布在伊犁和塔城不同分布点的新疆野苹果天然种群进行了野外调查。应用“空间代替时间”理论编制新疆野苹果种群特定时间生命表,绘制种群存活曲线和死亡率曲线;利用生存分析理论,分析其种群数量动态变化;并应用时间序列模型,预测种群的发展趋势。结果表明:1)新疆野苹果主要生长在海拔 870—1576 m 的陡坡、沟谷、河漫滩和缓坡草场四种生境。河漫滩生境,物种丰富度和植被盖度最高,植被盖度高达 70%—80%。该生境下新疆野苹果多与杏、黄果山楂、毛叶稠李、新疆忍冬等物种形成共优群落。其他三种生境,新疆野苹果多以纯林形式存在。2)伊犁种群病虫害严重,死亡率为 7%,干枝、枯枝率达 85%—90%;塔城种群几乎无病虫害,死亡率仅为 2%,干枝、枯枝率仅为 2%—5%。3)伊犁种群为衰退型,种群幼龄个体少,尤其是幼苗数量极少,种群多个生长发育阶段均呈现衰退的动态。严重的病虫害、过渡放牧和收割牧草是造成伊犁种群衰退的主要因素。塔城种群为增长型,种群幼龄个体多,幼苗数量足,但种群从幼苗过渡到幼树极困难。塔城不同分布点种群面临的问题不同。4)在未来 2、3 和 4 个龄级后,伊犁和塔城种群均呈现幼龄(幼树和小树)个体减少、老龄(大树和老树)个体增加的态势,种群衰退趋势明显。基于对新疆野苹果种群现状和存在问题的分析,结合实地调查,提出如下建议:1)针对伊犁种群,应首先应用生物防治等技术严格控制住病虫害的继续蔓延和加重;其次考虑建立国家级或省级新疆野苹果自然保护区并在保护区划分出优先最小保护单元,缓解一直存在的林牧矛盾。2)针对塔城种群,应根据不同分布点面临问题的不同制定相应的保护和管理措施。对幼苗死亡率高的额敏种群,应首先减少或限定风景区游客数量,其次在风景区内划分核心保护区和一般保护区,核心保护区内禁止人为活动;对托里种群,应首先加快建立高精度的自然灾害监测预警体系,其次减少放牧;对裕民种群,应采取人工辅助措施优化生境,促进种群幼苗的萌发、各阶段的顺利过渡和种群的稳定增长。**关键词:**新疆野苹果;伊犁和塔城地区;年龄结构;种群动态

## Population structure and dynamic characteristics of *Malus sieversii* distributed in Ili and Tacheng regions of Xinjiang, China

QIN Aili<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>2</sup>, CHEN Qiang<sup>3</sup>, ZHENG Xiangkun<sup>4</sup>, JIN Kun<sup>1,\*</sup>

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Key Laboratory of Biodiversity Conservation of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China

3 Tacheng Forestry Research Institute, Yili 834700, China

基金项目:第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk1200, 2021xjkk1203-09, 2021xjkk1205)

收稿日期:2024-03-20; 网络出版日期:2024-09-23

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jk2002@caf.ac.cn

4 Beijing Bayi School Affiliated Yuquan Middle School, Beijing 100091, China

**Abstract:** *Malus sieversii* (Ledeb.) M. Roem., a tertiary relict species, is the ancestor of modern cultivated apples. It is also a second-class key protected wild plant in China, only distributed in Ili and Tacheng Prefecture of Xinjiang in China. In the past decade, its distribution area, the number of populations and individuals has been decreasing. In order to comprehensively understand the survival status of *M. sieversii* in the whole distribution range of China, its community species composition, population structure and dynamic characteristics, a field investigation on the natural population of *M. sieversii* distributed in different sites of Ili and Tacheng was conducted. The “space instead of time” theory was used to compile a time-specific life table of *M. sieversii*, and its population survival curve and death curve were drawn. The survival analysis theory was used to analyze the dynamic changes of the population. Time series models were used to predict population trends. The results showed that: 1) *M. sieversii* mainly grew in four habitats (steep slope, valley, flood plain and gentle slope grassland) at an altitude of 870—1576 m. Among the four habitats, the flood plain had the highest species richness and vegetation coverage, reaching 70%—80%. In this habitat, *M. sieversii* coexisted with other species such as *Armeniaca vulgaris*, *Crataegus pinnatifida*, *Lonicera tatarica* and *Spiraea salicifolia*, while in other three habitats, *M. sieversii* mostly exists in pure forest. 2) The Ili population has serious pests and diseases, with a mortality rate of 7%, and a dry and dead branch rate of 85%—90%. The population of Tacheng is almost free of diseases and pests, with a mortality rate of only 2% and the dry and dead branch rate of only 2%—5%. 3) The population of Ili showed a declining pattern with few young individuals especially seedlings and a declining trend dynamic multiple growth and development stages. Severe pests and diseases, overgrazing, and harvesting of forage are the main factors causing population decline. The population of Tacheng showed a growing pattern with sufficient young individuals especially seedlings. But there are huge difficulties in successfully transition from seedlings to young trees and young trees to small trees. The population in different sites in Tacheng faces different problems. 4) After the next 2nd, 3rd and 4th age classes, both Ili and Tacheng populations showed a trend of decreasing of young individuals and increasing of elderly trees, and the population declining trend was obvious. Based on the analyses of the current situation and existing problems of *M. sieversii*, combined with field investigations, the following suggestions are proposed: 1) For the Ili population, biological control and other technologies should be applied first to strictly control the continued spread and aggravation of diseases and pests; Secondly, the establishment of a national or provincial-level Nature Reserve of *M. sieversii* and the division of priority and minimum protection units in the reserve should be considered to alleviate the long-standing forest pastoral conflict. 2) For the Tacheng population, different protection and management measures should be made based on different problems faced by different populations. For Emin population with high seedling mortality rates, the number of tourists to scenic areas should be reduced or limited first. Secondly, core protected areas and general protected areas should be divided within the scenic areas, and human activities are strictly prohibited within the core protected areas; For Tuoli population, we should first accelerate the establishment of a high-precision monitoring and early warning system for natural disasters, and secondly reduce grazing; For Yumin population, artificial assistance measures should be taken to optimize the habitat, promote the germination of seedlings, smooth transition at each stage, and stable growth of the population.

**Key Words:** *Malus sieversii*; Ili and Tacheng regions; age structure; population dynamics

种群是物种存在的基本单位,是联系个体、群落和生态系统之间的纽带<sup>[1]</sup>。种群结构是种群的最基本特征,既能反映种群不同年龄个体的数量和配置状况,也能反映林木的整体生长状况,决定着种群的繁殖能力及种群的未来发展趋势和动态<sup>[2]</sup>,反映着种群与环境间的相互关系<sup>[3-4]</sup>。种群结构与动态是种群生态学研究的核心内容<sup>[5-6]</sup>,对分析种群现实特征和预测其未来变化趋势具有重要意义。

新疆野苹果(*Malus sieversii* (Ledebour) M. Roemer)隶属于蔷薇科(Rosaceae)、苹果属(*Malus*),目前分布

在中国、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦等几个国家,是中亚干旱带第三纪孑遗阔叶林的建群种,也是现代栽培苹果的祖先<sup>[7-8]</sup>。在我国主要分布于新疆伊犁河谷两侧的天山山区和塔城地区的塔尔巴哈台山南麓和巴尔鲁克山西侧海拔 800—1700 m 的山地<sup>[9-10]</sup>,是新疆野果林的重要组成部分。近年来,由于病虫害的干扰及人类放牧等活动对其生境的破坏,其分布面积锐减,自 1991 年至今一直被列为国家二级重点保护野生植物<sup>[11]</sup>。为探讨该物种种群年龄结构及动态特征,国内学者在该物种分布的不同区域开展了系列种群生态学研究<sup>[12-21]</sup>。研究区域位于伊犁巩留和新源的有 6 篇<sup>[12, 16-18, 20-21]</sup>,仅在伊犁新源的有 2 篇<sup>[14-15]</sup>。8 篇研究工作表明:新疆野苹果巩留种群呈衰退型,从 2007 年到 2021 年,种群中幼苗严重不足的问题一直未得到解决,种群衰退更严重。新源种群从 2007 年的稳定型<sup>[21]</sup>发展到衰退型<sup>[12, 14-18, 20]</sup>。目前,巩留和新源种群均呈现出中龄个体多,幼苗、幼树和老树不足的问题,种群现状堪忧。研究区域位于塔城地区的有 2 篇工作<sup>[13, 19]</sup>,其中 1 篇位于塔城的额敏和托里<sup>[13]</sup>,1 篇仅位于塔城的额敏<sup>[19]</sup>。2 篇研究表明塔城额敏和托里种群均呈增长型,中龄个体数多且稳定,幼龄个体数多但不稳定,种群对外界干扰敏感。上述研究,侧重分析的是某一年份伊犁地区局部种群<sup>[12, 14-18, 20-21]</sup>或塔城地区局部种群<sup>[13, 19-20]</sup>的现状,尚未见该物种在国内整个分布区(伊犁和塔城地区)、基于同一调查年份的种群年龄结构的综合研究和比较分析。基于此,本文通过野外调查,对比分析伊犁和塔城地区新疆野苹果种群年龄结构特征、生存现状和受威胁状况,利用种群数量变化动态指数及生存分析等数学模型,对种群未来发展趋势进行预测,以期新疆野苹果种群的保护、管理、生态修复和建设提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区域为新疆伊犁和塔城地区,新疆野苹果的集中分布区(图 1)。伊犁地区的研究区域位于巩留县和新源县。巩留县位于伊犁河谷中东部,年均温 7.4 °C,年均降水 256 mm<sup>[21]</sup>;新源县位于伊犁河谷东端,年均温 7.7 °C,年均降水量 580 mm<sup>[22]</sup>。塔城地区的研究区域在裕民县、托里县和额敏县。裕民县位于塔额盆地南缘、准噶尔盆地西缘。气象资料显示年均温 7.6 °C,年总降水量为 304.1 mm;托里县位于塔城地区中西部,年均温 5.3 °C,年均降水为 233.1 mm<sup>[13]</sup>;额敏县位于塔城地区西北部,准噶尔盆地西北边缘,年均温 6.5 °C,年均降水 274.3 mm<sup>[13]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与野外调查

于 2022 年 8 月,在新疆野苹果集中分布区布设样地,根据分布地的地形和地势,样地大小为 20 m×20 m 或 10 m×40 m。其中伊犁地区共设置样地 18 块(巩留县 14 块、新源县 4 块)、塔城地区共设置样地 7 块(裕民县 3 块、额敏县 2 块、托里县 2 块)。样地的经纬度、海拔等具体信息详见表 1。每个样地内设置 4 个 10 m×10 m 的样方。调查、测定并记录每个样方的总盖度、样方内高度≥1.3 m 的每种维管植物及其个体数、胸径(DBH)、高度和冠幅;调查高度<1.3 m 的新疆野苹果的个体数、基径(*D*)、高度和冠幅等指标。

### 2.2 种群年龄结构划分

采用径级结构代替年龄结构的方法,分析新疆野苹果种群的年龄结构。根据新疆野苹果的生长特点,参照冯涛等(2007)<sup>[21]</sup>和田润炜等(2016)<sup>[13]</sup>对新疆野苹果年龄级的划分标准,结合高度(*H*)和胸径(DBH)数据,将新疆野苹果划分为 13 个龄级。I 级的划分根据植株高度。植株高度小于 1.3 m( $H < 1.3$  m)。II 级以后龄级的划分,植株高度均高于 1.3 m。II 级(0 cm < DBH ≤ 5 cm)、III 级(5 cm < DBH ≤ 10 cm)、IV 级(10 cm < DBH ≤ 15 cm)、V 级(15 cm < DBH ≤ 20 cm)、VI 级(20 cm < DBH ≤ 25 cm)、VII 级(25 cm < DBH ≤ 30 cm)、VIII 级(30 cm < DBH ≤ 35 cm)、IX 级(35 cm < DBH ≤ 40 cm)、X 级(40 cm < DBH ≤ 45 cm)、XI 级(45 cm < DBH ≤ 50 cm)、XII 级(50 cm < DBH ≤ 55 cm)和 XIII 级(DBH > 55 cm)。其中 I 级为幼苗;II 到 IV 级为幼树;V 级为小树;VI 到 VII 级为中树;VIII 到 IX 级为大树;X 到 XIII 级为老树。

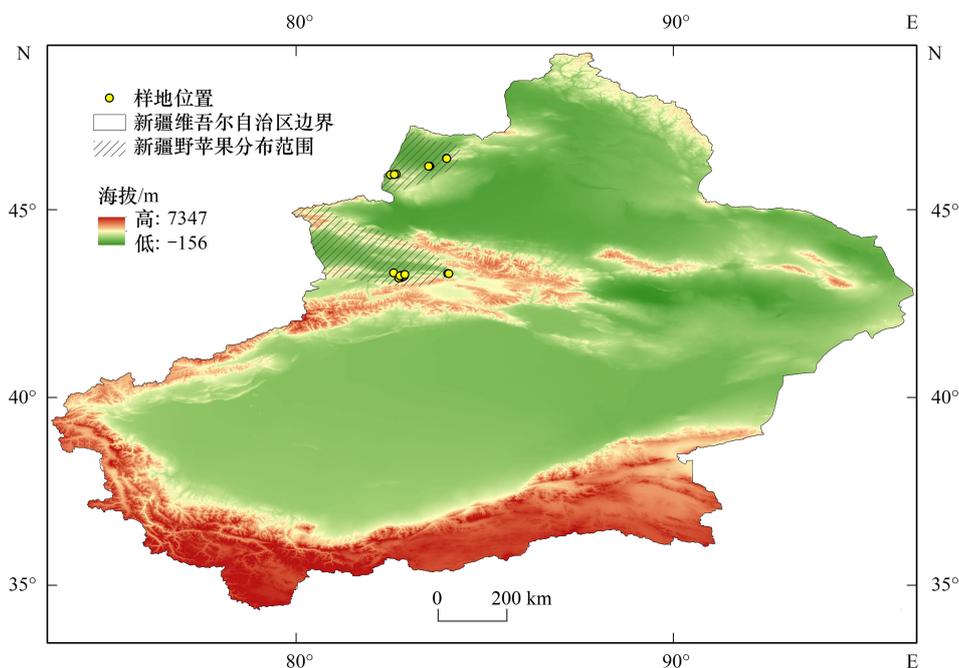


图 1 新疆野苹果在中国的分布区域和样地设置

Fig.1 The distribution range of *Malus sieversii* in China and the geographical location of the plot we set up

### 2.3 种群静态生命表及存活曲线

静态生命表是用特定调查时间收集的种群所有个体的径级数据编制而成的<sup>[23]</sup>。考虑到野外调查过程中存在的系统抽样误差,可能导致生命表编制过程中出现死亡率为负的情况,本研究参照江洪<sup>[24]</sup>在云杉种群生态学中所采用的匀滑技术对新疆野苹果的初始调查数据进行匀滑处理,进而编制新疆野苹果的种群静态生命表。

存活曲线的绘制是以径级相对龄级为横坐标,以  $\ln l_x$  为纵坐标获得的<sup>[2]</sup>。通过对指数函数(Deevey-II型:  $N_x = N_0 e^{-bx}$ )和幂函数(Deevey-III型:  $N_x = N_0 x^{-b}$ )的数学模型<sup>[25]</sup>进行拟合,依据决定系数( $R^2$ )值、 $F$ 检验值来判定模型拟合效果。方程式中:  $N_0$  为种群形成初期的存活个数;  $N_x$  为种群第  $x$  龄级内存活数的个体数;  $b$  为死亡率。

### 2.4 种群年龄结构动态分析

采用陈晓德(1998)<sup>[26]</sup>种群结构分析方法量化新疆野苹果的种群结构动态,反映种群或相邻龄级间个体数量的动态关系<sup>[27-28]</sup>。量化指数及公式如下:

$$\text{种群龄级间动态指数}(V_n): \quad V_n = \frac{S_n - S_{n+1}}{\max(S_n, S_{n+1})} \times 100\%$$

忽略外部干扰时,种群年龄结构的数量变化动态指数( $V_{pi}$ )

$$V_{pi} = \frac{\sum_{n=1}^{k-1} (S_n V_n)}{\sum_{n=1}^{k-1} S_n}$$

考虑外部干扰时,种群结构动态指数( $V'_{pi}$ )

$$V'_{pi} = \frac{\sum_{n=1}^{k-1} (S_n V_n)}{k \min(S_1, S_2, S_3, \dots, S_n) \sum_{n=1}^{k-1} S_n}$$

种群对外界干扰所承担的风险概率( $P_{极大}$ )

$$P_{\text{极大}} = \frac{1}{k \min(S_1, S_2, S_3, \dots, S_n)}$$

式中,  $S_n$  与  $S_{n+1}$  分别为第  $n$  和第  $n+1$  龄级的个体数;  $k$  为种群大小级数量;  $-1 \leq V_n \leq 1$ 、 $V_n$ 、 $V_{pi}$ 、 $V'_{pi}$  取正、负、0 值时分别反映种群个体数量的增长、衰退和稳定的结构动态关系, 仅当  $p$  取值为最大时才会对种群动态构成最大的影响<sup>[2]</sup>。

### 2.5 种群数量动态的时间序列预测

采用一次移动平均法, 对新疆野苹果种群在未来 2、3 和 4 个龄级时间后不同龄级个体数量变化进行预测<sup>[29]</sup>。计算公式如下:

$$M_t = \frac{1}{n} \sum_{k=t-n-1}^t X_k$$

式中,  $n$  为预测时间;  $t$  为龄级;  $X_k$  为  $k$  龄级内的个体数;  $M_t$  为经过  $n$  个龄级时间后在  $t$  时刻的平均值。

## 3 结果与分析

### 3.1 新疆野苹果种群分布特征及生存现状

调查发现, 研究区域内新疆野苹果海拔分布的下限是 870 m, 上限是 1576 m。伊犁和塔城均主要有 4 种分布生境, 分别是陡坡、沟谷、河漫滩和缓坡草场。河漫滩生境的群落物种组成种类最丰富。乔木层, 新疆野苹果多与杏 (*Armeniaca vulgaris*)、黄果山楂 (*Crataegus pinnatifida*)、毛叶稠李 (*Padus avium*) 等物种伴生; 灌木层主要有树锦鸡儿 (*Caragana arborescens*)、新疆忍冬 (*Lonicera tatarica*)、天山绣线菊 (*Spiraea salicifolia*)、腺齿蔷薇 (*Rosa albertii*)、黑果小檗 (*Berberis atrocarpa*)、准噶尔栒子 (*Cotoneaster songoricus*)、天山槭 (*Acer semenovii*) 和药鼠李 (*Rhamnus cathartica*) 等物种 (表 1)。陡坡、沟谷和缓坡草场三种生境中, 新疆野苹果多以纯林形式存在。低海拔区域 (<1500 m) 偶形成以新疆野苹果为单优势种, 伴有新疆忍冬、圆叶小檗 (*Berberis nummularia*)、黑果小檗、黄果山楂、毛叶稠李、腺齿蔷薇和杏等物种的极少个体; 高海拔区域 (>1500 m) 多与小叶桦 (*Betula microphylla*) 和雪岭云杉 (*Picea schrenkiana*) 伴生 (表 1)。

表 1 样地信息及新疆野苹果群落物种组成

Table 1 Plot information and species composition of *Malus sieversii*

种群 Population	样地 Plot	经度/(°) Longitude	纬度/(°) Latitude	海拔 Altitude/m	生境 Habitat	群落物种组成 Species composition
伊犁	GL01	82.7547	43.2236	1283	陡坡	新疆野苹果纯林
	GL02	82.7334	43.1784	1357		新疆野苹果纯林
	GL03	82.8021	43.1888	1455		新疆野苹果、新疆忍冬
	GL04	82.7330	43.1783	1485		新疆野苹果、新疆忍冬、圆叶小檗
	GL05	82.7306	43.1781	1515		新疆野苹果、黄果山楂
	GL06	82.7294	43.1785	1576		新疆野苹果纯林
	GL07	82.8536	43.2499	1313	沟谷	新疆野苹果、黑果小檗
	GL08	82.8616	43.2319	1446		新疆野苹果、黑果小檗
	GL09	82.8629	43.2140	1542		新疆野苹果、黑果小檗、小叶桦、雪岭云杉
	GL10	82.5909	43.3116	959	河漫滩	新疆野苹果、树锦鸡儿、新疆忍冬、黄果山楂、杏、黑果小檗、新疆鼠李、准噶尔栒子、毛叶稠李、天山槭
	GL11	82.8212	43.2564	1172		新疆野苹果、宽刺蔷薇 ( <i>Rosa platyacantha</i> )、新疆忍冬、黑果小檗、杏、天山绣线菊、腺齿蔷薇、新疆鼠李、准噶尔栒子
	GL12	82.7837	43.2403	1281	缓坡草场	新疆野苹果、杏、新疆忍冬
	XY01	82.8548	43.2586	1311		新疆野苹果纯林
	GL13	82.7677	43.2332	1404		新疆野苹果纯林
XY02	84.0280	43.2999	1452		新疆野苹果纯林	
GL14	82.7618	43.2316	1465		新疆野苹果、黑果小檗、新疆忍冬、灰毛忍冬 ( <i>Lonicera cinerea</i> )、楸子 ( <i>Malus prunifolia</i> )	

续表

种群 Population	样地 Plot	经度/(°) Longitude	纬度/(°) Latitude	海拔 Altitude/m	生境 Habitat	群落物种组成 Species composition
塔城	XY03	84.0564	43.2910	1523		新疆野苹果、黄果山楂
	XY04	82.8870	43.2724	1573		新疆野苹果纯林
	YM01	82.6597	45.9406	1262	陡坡	新疆野苹果、新疆忍冬、腺齿蔷薇、灰毛忍冬、毛叶稠李
	TL01	83.5533	46.1555	870	沟谷	新疆野苹果纯林
	TL02	83.5237	46.1531	956		新疆野苹果纯林
	YM02	82.5065	45.9270	964	河漫滩	新疆野苹果、圆叶小檗、黑果小檗、天山绣线菊、腺齿蔷薇、准噶尔栒子、药鼠李
	YM03	82.6069	45.9341	1220		新疆野苹果、宽刺蔷薇、新疆忍冬、天山绣线菊、腺齿蔷薇、药鼠李
	EM01	83.9936	46.3692	1235	缓坡草场	新疆野苹果、宽刺蔷薇
	EM02	83.9995	46.3580	1275		新疆野苹果、宽刺蔷薇、树锦鸡儿

GL: 巩留 Gongliu; XY: 新源 Xinyuan; YM: 裕民 Yumin; TL: 托里 Tuoli; EM: 额敏 Emin

对新疆野苹果种群生存现状的调查分析显示:伊犁种群的死亡株数为 26 株(巩留 25 株、新源 1 株),死亡率为 7%。伊犁种群的病虫害严重,上部树梢多干枝、枯枝,有干枝、枯枝的个体的比率达 85%—90%。塔城种群的死亡株数为 3 株(额敏种群),死亡率为 2%。塔城种群的长势良好,病虫害少,上部树梢有干枝、枯枝的个体比率仅为 2%—5%。

### 3.2 种群年龄结构分析

本研究共调查新疆野苹果植株 539 株,种群平均密度为 0.057 株/m<sup>2</sup>。伊犁地区共调查 373 株,种群密度为 0.057 株/m<sup>2</sup>;塔城地区共调查 171 株,种群密度为 0.061 株/m<sup>2</sup>,塔城种群密度略高于伊犁种群,但两者差异不大。

伊犁和塔城种群年龄结构均是完整的,所不同的是各龄级的占比。伊犁种群的老树占比最高,达 28%,幼苗占比最低,为 5%。幼树、小树、中树和大树比例近似,分别为 21%、15%、16%和 15%,幼苗、幼树的比例均低于老树的比例,种群呈衰退型(图 2)。塔城种群幼苗占比最高,为 32%,幼树、小树、中树、大树和老树的比例分别为 9%、11%、22%、18%和 8%,幼苗、幼树比例均高于老树的比例,种群呈增长型(图 2)。

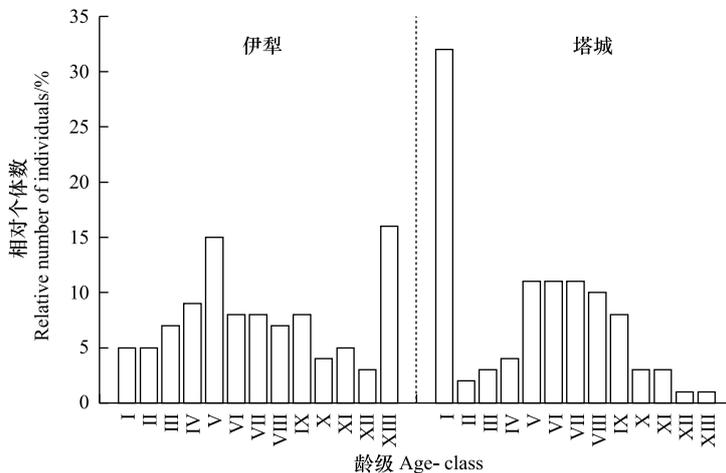


图 2 伊犁和塔城新疆野苹果种群的年龄结构

Fig.2 Age structure of *Malus sieversii* distributed in Ili and Tacheng regions

I: 高度<1.3 m; II: 高度>1.3 m, 0 cm<胸径 ≤5 cm; III: 高度>1.3 m, 5 cm<胸径 ≤10 cm; IV: 高度>1.3 m, 10 cm<胸径 ≤15 cm; V: 高度>1.3 m, 15 cm<胸径 ≤20 cm; VI: 高度>1.3 m, 20 cm<胸径 ≤25 cm; VII: 高度>1.3 m, 25 cm<胸径 ≤30 cm; VIII: 高度>1.3 m, 30 cm<胸径 ≤35 cm; IX: 高度>1.3 m, 35 cm<胸径 ≤40 cm; X: 高度>1.3 m, 40 cm<胸径 ≤45 cm; XI: 高度>1.3 m, 45 cm<胸径 ≤50 cm; XII: 高度>1.3 m, 50 cm<胸径 ≤55 cm; XIII: 高度>1.3 m, 胸径>55 cm

### 3.3 种群静态生命表与存活曲线、死亡率曲线、消失率曲线分析

对新疆野苹果原始调查数据进行匀滑修正<sup>[24]</sup>后编制的种群静态生命表见表 2。由表 2 知:随着植株的生长,标准化后存活个体数( $l_x$ ) 逐渐减小,个体的期望寿命总体呈下降趋势,伊犁和塔城种群在幼树和小树阶段均表现出较大的生命期望值。存活曲线是反映种群个体在各年龄级的存活状况曲线<sup>[2]</sup>,可直观的表达种群个体在各龄级的存活过程。经过匀滑修正后的伊犁和塔城种群的存活曲线见图 3。由图 3 知,伊犁种群各龄级的死亡率基本相同,存活曲线为 Deevey-II 型;塔城种群幼苗的死亡率高于其他龄级,幼树、小树、中树和 大树各龄级死亡率基本相同(表 2、图 3),存活曲线介于 Deevey-II 型和 Deevey-III 型之间。进一步经模型检验的结果(表 3)显示:伊犁和塔城种群均与 Deevey-II 型有较高的相关系数,两地种群的存活曲线均为 Deevey-II 型。

表 2 伊犁和塔城新疆野苹果种群静态生命表分析

Table 2 Static life table of *Malus sieversii* populations in Ili and Tacheng Regions

种群 Population	龄级 Age-class	$a_x$	$a'_x$	$l_x$	$d_x$	$q_x$	$L_x$	$T_x$	$E_x$	$K_x$	$S_x$	$\ln l_x$
伊犁	I	17	53	1000.00	75.47	0.08	962.26	6613.21	6.61	0.08	0.92	6.91
	II	19	49	924.53	75.47	0.08	886.79	5650.94	6.11	0.09	0.92	6.83
	III	25	45	849.06	75.47	0.09	811.32	4764.15	5.61	0.09	0.91	6.74
	IV	34	41	773.58	75.47	0.10	735.85	3952.83	5.11	0.10	0.90	6.65
	V	58	37	698.11	75.47	0.11	660.38	3216.98	4.61	0.11	0.89	6.55
	VI	29	33	622.64	75.47	0.12	584.91	2556.60	4.11	0.13	0.88	6.43
	VII	32	29	547.17	75.47	0.14	509.43	1971.70	3.60	0.15	0.86	6.30
	VIII	27	25	471.70	75.47	0.16	433.96	1462.26	3.10	0.17	0.84	6.16
	IX	30	21	396.23	75.47	0.19	358.49	1028.30	2.60	0.21	0.81	5.98
	X	15	17	320.75	75.47	0.24	283.02	669.81	2.09	0.27	0.76	5.77
	XI	19	13	245.28	75.47	0.31	207.55	386.79	1.58	0.37	0.69	5.50
	XII	10	9	169.81	75.47	0.44	132.08	179.25	1.06	0.59	0.56	5.13
	XIII	58	5	94.34	94.34	1.00	47.17	47.17	0.50	4.55	-	4.55
塔城	I	54	54	1000.00	629.63	0.63	685.19	2703.70	2.70	0.99	0.37	6.91
	II	3	20	370.37	37.04	0.10	351.85	2018.52	5.45	0.11	0.90	5.91
	III	5	18	333.33	37.04	0.11	314.81	1666.67	5.00	0.12	0.89	5.81
	IV	7	16	296.30	37.04	0.13	277.78	1351.85	4.56	0.13	0.88	5.69
	V	19	14	259.26	37.04	0.14	240.74	1074.07	4.14	0.15	0.86	5.56
	VI	20	12	222.22	37.04	0.17	203.70	833.33	3.75	0.18	0.83	5.40
	VII	19	10	185.19	37.04	0.20	166.67	629.63	3.40	0.22	0.80	5.22
	VIII	17	8	148.15	18.52	0.13	138.89	462.96	3.13	0.13	0.88	5.00
	IX	13	7	129.63	37.04	0.29	111.11	324.07	2.50	0.34	0.71	4.86
	X	5	5	92.59	0.00	0.00	92.59	212.96	2.30	0.00	1.00	4.53
	XI	5	5	92.59	55.56	0.60	64.81	120.37	1.30	0.92	0.40	4.53
	XII	2	2	37.04	0.00	0.00	37.04	55.56	1.50	0.00	1.00	3.61
	XIII	2	2	37.04	37.04	1.00	18.52	18.52	0.50	3.61	-	3.61

$a_x$ :  $x$  龄级内现有个体数 Individual number of age class  $x$ ;  $a'_x$ : 对  $a_x$  数据进行匀滑处理后存活个体数 The revised data of  $a_x$ ;  $l_x$ : 龄级开始时标准化存活个体数 The standardized number of surviving individuals of age class  $x$ ;  $d_x$ : 从  $x$  到  $x+1$  龄级间隔期内标准化死亡个体数 The standardized number of mortality from age class  $x$  to age class  $x+1$ ;  $q_x$ : 从  $x$  到  $x+1$  龄级间隔期间的死亡率 Mortality rate from age class  $x$  to age class  $x+1$ ;  $L_x$ : 从  $x$  到  $x+1$  龄级间隔期间还存活的个体数 The number of surviving individuals from age class  $x$  to age class  $x+1$ ;  $T_x$ : 从  $x$  龄级到超过  $x$  龄级的个体总数 Total individuals of age class elder than  $x$  (including age class  $x$ );  $E_x$ : 进入  $x$  龄级个体的平均期望寿命 Life expectancy;  $K_x$ : 消失率 Vanish rate;  $S_x$ : 存活率 Survival rate;  $\ln l_x$ : 标准化存活个体数的自然对数 The natural logarithm of  $l_x$

伊犁和塔城种群的死亡率与消失率曲线见图 4。由图 4 知,同一分布点新疆野苹果种群死亡率和消失率

的变化趋势基本一致,不同分布点新疆野苹果种群死亡率和消失率的变化不同。伊犁种群的死亡率和消失率随龄级的增加逐渐升高。塔城种群 I 到 II 龄级(即幼苗到幼树)死亡率和消失率大幅下降,III—VII 龄级小幅上升,此后出现下降、上升反复波动的现象,进入第 XI 龄级(老树初始阶段)死亡率和消失率达到最高。

3.4 种群年龄结构的动态变化分析

基于种群动态量化分析方法,对新疆野苹果种群年龄结构动态指数的分析结果见表 4。由表 4 知:伊犁种群龄级间动态指数  $V_1—V_4、V_6、V_8、V_{10}、V_{12}$  均小于 0,说明 I 到 V 龄级、VI—VII 龄级、VIII—IX 龄级、X—XI 龄级、XII—XIII 龄级呈现衰退的结构动态关系; $V_5、V_7、V_9$  和  $V_{11}$  大于 0,说明 V—VI、VII 到 VIII、XI 到 X、XI 到 XII 呈增长的结构动态。塔城种群  $V_2—V_5$  小于 0,说明从 II 到 VI 龄级种群呈现衰退的结构动态; $V_1、V_6—V_9、V_{11}$  均大于 0,说明从 I 到 II、VI 到 X、XI 到 XII 呈增长的结构动态; $V_{10}$  和  $V_{12}$  等于 0,说明 X 到 XI、XII 到 XIII 呈稳定的结构动态关系。综上,伊犁种群幼苗到幼树、幼树到小树、中树、大树及老树前期均表现出衰退的结构动态。塔城种群仅幼树到小树、小树到中树阶段表现出衰退的结构动态。进一步对新疆野苹果总体数量动态变化指数  $V_{pi}$  (不考虑外部干扰) 和  $V'_{pi}$  (考虑外界干扰) 的计算结果显示:伊犁种群  $V_{pi} > V'_{pi} = 0$ ,表明伊犁种群虽呈增长型,但增长性不高。塔城种群  $V_{pi} > V'_{pi} > 0$ ,表明塔城种群呈增长型。伊犁种群的随机干扰风险极值( $P_{max}$ )0.011 远小于塔城种群 0.038,说明伊犁种群在面对环境或人为干扰时比塔城种群具更强的敏感性,种群整体表现脆弱。

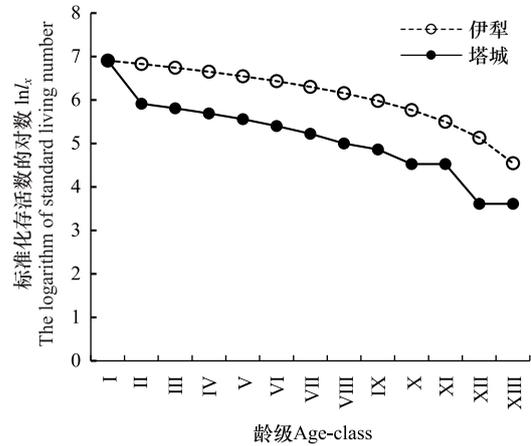


图 3 新疆野苹果种群的存活曲线

Fig.3 Survival curve of *Malus sieversii* populations

表 3 种群存活曲线的检验模型

Table 3 Test models of survival curve of *Malus sieversii* populations

种群 Populations	曲线方程 Curve function	决定系数 Coefficient of determination ( $R^2$ )	F	P
伊犁	$y = 7.477e^{-0.030x}$	0.869	72.698	0.000
	$y = 7.596x^{-0.129}$	0.632	18.927	0.001
塔城	$y = 6.967e^{-0.046x}$	0.915	119.056	0.000
	$y = 7.352x^{-0.217}$	0.784	39.894	0.000

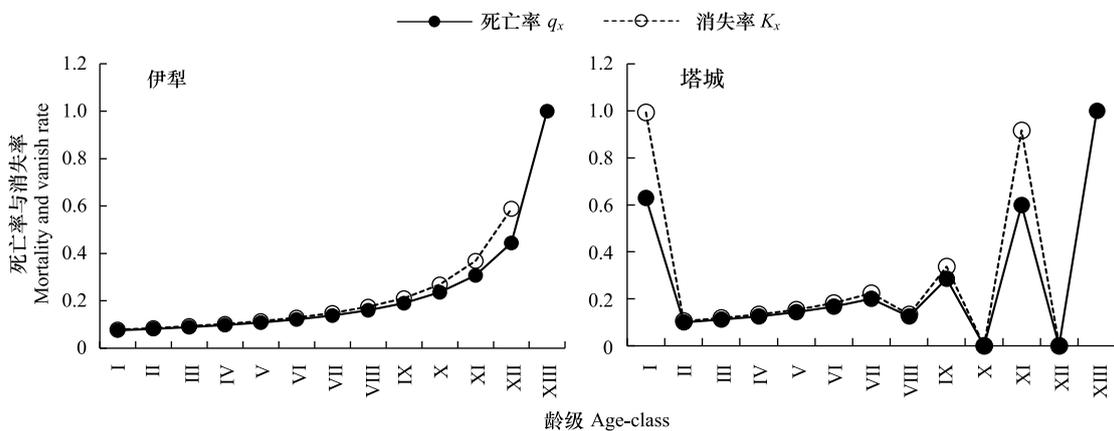


图 4 新疆野苹果种群的死亡率和消失率曲线

Fig.4 Mortality and vanish rate of *Malus sieversii* populations

表 4 新疆野苹果种群年龄结构动态指数

Table 4 Dynamic indices of *Malus sieversii* population age structure

龄级 Age class	动态指数级 Dynamic index class	种群动态指数 Population dynamic indices						
		GL	XY	Ili	TL	EM	YM	塔城
I—II	$V_1$	-0.105		-0.105		0.962	0.500	0.944
II—III	$V_2$	-0.240		-0.240		0.500	-0.750	-0.400
III—IV	$V_3$	-0.265		-0.265	-1.000	0.000	0.750	-0.286
IV—V	$V_4$	-0.414		-0.414	-0.444	-0.857	-0.667	-0.632
V—VI	$V_5$	0.517	-1.000	0.500	0.333	0.143	-0.625	-0.050
VI—VII	$V_6$	-0.097	0.000	-0.094	0.167	-0.455	0.625	0.050
VII—VIII	$V_7$	0.258	-0.750	0.156	-0.375	0.455	0.000	0.105
VIII—IX	$V_8$	0.130	-0.600	-0.100	0.250	0.667	-0.400	0.235
IX—X	$V_9$	0.600	0.300	0.500	0.833	-0.500	1.000	0.615
X—XI	$V_{10}$	-0.273	-0.125	-0.211	1.000	-0.200		0.000
XI—XII	$V_{11}$	0.364	0.625	0.474		0.600		0.600
XII—XIII	$V_{12}$	-0.696	-0.914	-0.828		0.500	-1.000	0.000
	$V_{pi}$	0.066	0.018	0.038	0.198	0.596	0.307	0.357
	$V'_{pi}$	0.001	-	0.000	-	0.046	-	0.014
	$P_{max}$	0.011	-	0.008	-	0.077	-	0.038

$V_n$ : 种群从  $n$  到  $n+1$  的数量动态变化指数 Number dynamic index of the population from age class  $n$  to age class  $n+1$ ;  $V_{pi}$ : 忽略外部干扰时, 种群的数量动态变化指数 Number dynamic index of the population when the external disturbance is ignored;  $V'_{pi}$ : 考虑外部干扰时, 种群的数量动态变化指数 Number dynamic index of the population when the external disturbance is considered;  $P_{极大}$ : 随机干扰风险极大值 Maximum value at risk with random interference

### 3.5 种群生存分析

进一步对新疆野苹果种群生存率、累计死亡率、死亡密度和危险率函数的分析结果表明(图 5 和表 5): 随着龄级的增加, 新疆野苹果种群生存率函数下降, 累积死亡率函数逐渐上升。伊犁种群, 在第 VI 到第 VII 龄级间某处, 生存率函数和累积死亡率函数相交, 种群达到平衡, 此后种群进入衰退状态。塔城种群生存率函数随龄

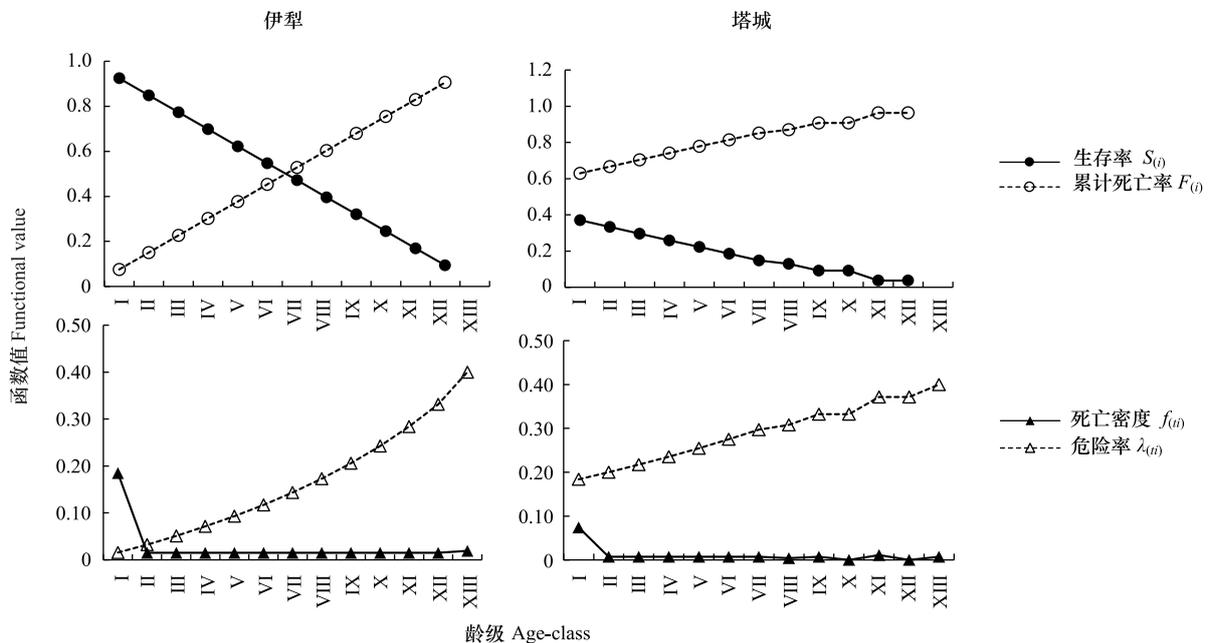


图 5 新疆野苹果种群 4 种生存分析函数

Fig.5 Four survival analysis functions of *Malus sieversii* populations

级增加,总体呈缓缓下降的趋势,死亡率函数的变化趋势则与之相反。

死亡密度函数值随龄级的增加先急剧下降,最后趋于平稳。伊犁和塔城种群在第 II 龄级时,死亡密度函数值已分别降至 1.5% 和 0.7%,此后函数值均分别趋于稳定。伊犁和塔城种群的危险率总体表现出随龄级增加升高的趋势,除塔城种群危险率在第 X 和 XII 龄级时保持稳定外。

表 5 种群生存函数分析

Table 5 Estimated values of survival analysis functions

种群 Population	龄级 Age class	生存率函数 Survival rate $S_{(i)}$	累计死亡率函数 Cumulative mortality rate $F_{(i)}$	死亡密度函数 Mortality density $f_{(i)}$	危险率函数 Hazard rate $\lambda_{(i)}$
伊犁	I	0.925	0.075	0.185	0.016
	II	0.849	0.151	0.015	0.033
	III	0.774	0.226	0.015	0.051
	IV	0.698	0.302	0.015	0.071
	V	0.623	0.377	0.015	0.093
	VI	0.547	0.453	0.015	0.117
	VII	0.472	0.528	0.015	0.144
	VIII	0.396	0.604	0.015	0.173
	IX	0.321	0.679	0.015	0.206
	X	0.245	0.755	0.015	0.242
	XI	0.170	0.830	0.015	0.284
	XII	0.094	0.906	0.015	0.331
	XIII	0.000	1.000	0.019	0.400
塔城	I	0.370	0.630	0.074	0.184
	II	0.333	0.667	0.007	0.200
	III	0.296	0.704	0.007	0.217
	IV	0.259	0.741	0.007	0.235
	V	0.222	0.778	0.007	0.255
	VI	0.185	0.815	0.007	0.275
	VII	0.148	0.852	0.007	0.297
	VIII	0.130	0.870	0.004	0.308
	IX	0.093	0.907	0.007	0.332
	X	0.093	0.907	0.000	0.332
	XI	0.037	0.963	0.011	0.371
	XII	0.037	0.963	0.000	0.371
	XIII	0.000	1.000	0.007	0.400

### 3.6 新疆野苹果种群时间序列预测

以各龄级实际存活数为基数,按一次平均推移法预测各龄级在未来 2、3 和 4 个龄级时间后存活的个体数(表 6)。

伊犁种群在经历未来 2 个龄级时间后,第 I—V 龄级个体数减少,之后龄级间个体数增加、减少来回波动,但波动幅度不大。经历 3、4 龄级时间后,第 I—V 龄级个体数减少,从第 VI—XII 龄级,个体数总体呈现逐渐增加的趋势(除 IX 零级,保持稳定),到第 XIII 龄级,个体数又出现大幅下降。由此看出,伊犁种群幼苗、幼树和小树明显不足。塔城种群经历 2 个龄级时间后,III、IV、V 龄级出现下降,VI 龄级保持稳定,从 VII 龄级,个体数总体出现小幅增长;经历 3 个龄级时间后,塔城种群 IV—VI 龄级出现下降, VII 龄级个体数保持稳定,之后个体数总体呈现小幅增长;经历 4 个龄级时间后, V—VII 龄级个体数出现小幅下降,从第 VIII 龄级开始,个体数呈现增长趋势。综合看出,塔城种群虽不缺乏幼苗,但幼树、小树的数量明显不足。

表 6 新疆野苹果种群动态变化的时间序列分析

Table 6 Time sequence analysis of age structure of *Malus sieversii* population

龄级 Age class	伊犁地区				塔城地区			
	原始数据 Primary data	$M_2^{(1)}$	$M_3^{(1)}$	$M_4^{(1)}$	原始数据 Primary data	$M_2^{(1)}$	$M_3^{(1)}$	$M_4^{(1)}$
I	17				54			
II	19	18			3	29		
III	25	22	20		5	4	21	
IV	34	30	26	24	7	6	5	17
V	58	46	39	34	19	13	10	9
VI	29	44	40	37	20	20	15	13
VII	32	31	40	38	19	20	19	16
VIII	27	30	29	37	17	18	19	19
IX	30	29	30	30	13	15	16	17
X	15	23	24	26	5	9	12	14
XI	19	17	21	23	5	5	8	10
XII	10	15	15	19	2	4	4	6
XIII	58	34	29	26	2	2	3	4

$M_t^{(1)}$ : 经过 2,3 和 4 个龄级时间后  $t$  龄级的种群大小 Population size of age class  $t$  after 2, 3, and 4 age classes; (1) 移动平均法中的一次移动平均法标识 The symbol of the single moving average method in the moving average method

## 4 讨论

### 4.1 不同生境下新疆野苹果群落物种多样性

新疆野苹果分布的 4 种生境中,低海拔的河漫滩生境物种多样性最高,其次是低海拔的河谷生境。海拔作为温度、水分、光照和土壤养分的综合性生态变量,直接或间接地影响着植物群落物种多样性的高低<sup>[30]</sup>,被认为是区域植物群落空间分布格局和结构的决定性因子<sup>[31]</sup>。有研究表明,在水分充足的地区,物种多样性总体上呈现随海拔的上升,多样性下降的趋势<sup>[32]</sup>。河漫滩生境海拔偏低,新疆野苹果生存的小生境属于独特的地理环境所构成的湿润的“海洋性”气候<sup>[33]</sup>,水分充足。另外河漫滩是两种生态系统(陆地生态系统和水域生态系统)的交错地带,土壤具有较高的湿度和养分含量,适宜更多的植物生长,也是造成河漫滩生境群落物种多样性高的主要原因。海拔较高的陡坡和缓坡草场的物种多样性由于受海拔和人类活动的双重影响,造成物种多样性偏低。但山地植被植物群落物种多样性随海拔高度变化模式会因不同的气候区、不同的海拔跨度范围而不同,具体模式尚需进一步深入研究。

### 4.2 伊犁新疆野苹果种群的年龄结构特征与生存现状

种群结构是种群最基本的特征,能有效反映种群的存活状态、数量特征和动态变化<sup>[34-35]</sup>。本次对伊犁种群的调查共记录新疆野苹果个体 373 株,其中 I 龄级的幼苗个体仅有 17 株,种群为衰退型。这与以往 7 篇涉及到伊犁不同分布点种群的研究结论基本一致<sup>[12, 14-18, 20]</sup>。自 2007 年有新疆野苹果种群动态研究以来,幼苗个体的缺乏一直是伊犁新疆野苹果种群恢复过程中亟待破解的难题。杨磊等<sup>[36]</sup>对新疆野苹果种子萌发研究表明新疆野苹果种子具有较高的萌发率。因此从理论上,幼苗不应缺乏。通过我们的调查发现造成幼苗缺乏的最主要的原因一是牛羊对野苹果果实的啃食。对伊犁 18 个不同分布点种群的调查显示,13 个分布点均存在牛羊。大量果实成熟后落下被牛羊啃食,造成土壤种子库的不足是幼苗缺乏的原因之一。其二是林下杂草、牧草高度和盖度大。没被啃食的果实种子萌发后,林下杂草、牧草过高的盖度和高度,导致部分幼苗竞争力差被捂死,部分幼苗由于秋季收割牧草的扰动而减少<sup>[17]</sup>,另外,部分幼苗被秋季的集中放牧啃食掉。这些都是造成幼苗严重不足的关键因素。

除此之外,种群年龄结构的动态变化分析显示伊犁种群还面临幼苗到幼树、幼树到小树、小树到中树、中